(昭和 41 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

鋼材の脆性亀裂伝播特性におよぼす 低サイクル疲労の影響

正員 矢 島 浩* 正員 永 元 隆 一**
山 内 英 和*

Study on the propagation characteristics of brittle crack
in steel cumulated with low cycle fatigue

By Hiroshi Yajima, *Member*
Ryuichi Nagamoto, *Member*
Hidekazu Yamanouchi

Summary

The effect of low cycle fatigue on the propagation characteristics of brittle crack in steels has been studied by means of the double tension test. The specimens used were the mild steel for hull structure (i. e. the semi-killed steel) and the ferritic high notch toughness steel (i. e. the Al-killed steel pressed, acceleratedly cooled and tempered), both of which were cumulated with low cycle fatigue previous to the double tension test.

As a result of the study, it has been clarified that the arrest-transition temperature of brittle crack is raised with the cumulation of low cycle fatigue. More details obtained are as follows ;

1. There is no clear correlation observed between the increase of the arrest-transition temperature of brittle crack and the variations in the alternate stress of low cycle fatigue as well as in the cumulation number of that.

2. In case of the mild steel for hull structure, the arrest-transition temperature of brittle crack is raised with increase in the cumulated plastic strain below about 25 percent although it is kept nearly constant for the plastic strain above that critical value.

1 緒 言

船体の疲労破壊強度・脆性破壊強度に対する問題は、船体構造設計上特にクラックアレスター配置問題などに関連して、非常に関心ある問題である。疲労破壊強度ならびに脆性破壊強度に対する設計基準は、各々単独にはかなり確立化されている。たとえば、疲労破壊強度に関しては、平均応力または平均ひずみ、ならびに応力振幅またはひずみ振幅、さらに応力あるいはひずみ集中度が判明すれば、定量的検討が可能である^{1), 2), 3)}。その他。脆性破壊強度に関しては、脆性亀裂伝播停止現象に対する Griffith-Irwin 流のエネルギー条件式の応用⁴⁾ならびに stress intensity factor (K-value) の導入^{5), 6)} などによつて、使用条件 (温度・応力)・構造物の大きさ・使用材料の靱性などの間に存在する関係式が導びかれている。

しかるに、疲労破壊に脆性破壊が superpose するような問題、すなわち疲労亀裂が脆性亀裂に移行する問題、ならびに疲労蓄積 (繰返し予ひずみ) による靱性劣化に原因する脆性破壊の問題などに関する定量的取扱いは、船体構造設計に当つての今後の重要な課題であると考えられる。一方、1 回の塑性加工 (予ひずみ) による材料

原稿受付 昭和 41 年 7 月 10 日

*三菱重工㈱技術本部長崎研究所

**三菱重工㈱長崎造船所

の靱性におよぼす影響に関しては、阿部⁷⁾・大谷⁸⁾等の研究をはじめ多くの研究結果があるが、繰返し塑性加工（繰返し予ひずみ）による影響に関してはデータは非常に少ない^{9),10)}。

著者らは、これらの課題を解決する緒を得る目的で、一般船体用軟鋼（セミキルド鋼）ならびにフェライト系強靱鋼（強制冷却後焼もどしたアルミキルド鋼）の低サイクル疲労試験ならびに低サイクル疲労蓄積（繰返し予ひずみ）による靱性変化調査試験を実施し、脆性亀裂伝播特性におよぼす低サイクル疲労の影響を調査したのでここに報告する。

2 供 試 材

供試材としては、一般船体用軟鋼の代表としてロイド規格A級鋼（圧延ままの状態のセミキルド鋼、以下SK鋼

第1表 供試材の化学組成ならびに機械的性質

鋼 種	熱 処 理	チヤージ	符 号	板 厚 (mm)	化 学 組 成					機 械 的 性 質				フェライト 結晶粒度 (ASTM 0.8μ)
					C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	降伏点 (Kgf/mm ²)	引張強さ (Kgf/mm ²)	伸 び (%)	硬 度 (HRC 20℃)	
セミキルド鋼	圧延のまま	I	SK-I	12	0.17	0.04	0.57	0.022	0.021	27.7	45.9	27.0	12.6	6
		II	SK-II	12	0.16	0.10	0.74	0.012	0.020	29.1	46.0	26.5	13.5	6
アルミキルド鋼	強制冷却	I	AK-I	12	0.09	0.26	1.11	0.019	0.006	35.0	48.0 ~49.0	40.0 ~50.0	15.0	8~9
	+焼もどし	II	AK-II	12	0.08	0.26	1.07	0.009	0.011	38.1	47.2	23.0	—	8~9

第2表 各種遷移温度一覧(素材)

符 号	試験片採取方向	各 種 遷 移 温 度					
		2vTr15 (°C)	2vTr35 (°C)	2vTre (°C)	2vTrs (°C)	2pTre (°C)	2pTrs (°C)
SK-I	圧 延 方 向	-13	4	14	19	48	42
SK-II	圧 延 方 向	-28	-6	5	8	35	25
	圧 延 直 角 方 向	-12	27	5	7	—	—
AK-I	圧 延 方 向	-128	-119	-115	-115	-37	-37
	圧 延 直 角 方 向	-123	-114	-111	-109	—	—
AK-II	圧 延 方 向	—	—	—	—	-70	-70

注、 2vTr15 = 標準V切欠シャルピー衝撃試験により吸収エネルギーが15ft-lbを示す温度

2vTr35 = 標準V切欠シャルピー衝撃試験により吸収エネルギーが35ft-lbを示す温度

2vTre = 標準V切欠シャルピー衝撃試験により吸収エネルギーが最大値と最小値の平均を示す温度

2vTrs = 標準V切欠シャルピー衝撃試験により破断面の脆性破面率が50%を示す温度

2pTre = 標準プレス切欠シャルピー衝撃試験により吸収エネルギーが最大値と最小値の平均を示す温度

2pTrs = 標準プレス切欠シャルピー衝撃試験により破断面の脆性破面率が50%を示す温度

と呼ぶ)を、またフェライト系強靱鋼の代表として強制冷却後焼もどしたアルミキルド鋼(以下 AK 鋼と呼ぶ)を選んだ。各供試材の化学組成ならびに機械的性質を第 1 表に示す。

3 素材の靱性試験ならびに低サイクル疲労試験

3-1 各種靱性試験ならびにその結果

素材板厚中央部圧延方向ならびに圧延直角方向から、標準シャルピー衝撃試験片を採取し供試した。試験結果

第 3 表 二重引張試験結果(素材)

供試材 符号	試験片 符号	亀裂伝 播部巾 B (mm)	亀裂伝 播部平 均応力 σ (Kg/mm^2)	亀裂長さ O (mm)	停止温度 (最高温度) T ($^{\circ}\text{C}$)	$\frac{10^5}{T}$ ($^{\circ}\text{K}^{-1}$)	K_{IC} ($\text{Kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$)
S X I	S I-1	200	5.0	59.0	-24.0	4.02	39.9
	S I-2	200	5.0	20.0	-44.0	4.37	22.5
	S I-3	200	25.0	140.0	22.0	3.59	395.2
	S I-4	200	25.0	51.0	16.0	3.46	183.6
	S I-5	200	17.0	43.0	-4.0	3.72	113.7
	S I-6	200	10.0	99.0	-9.0	3.79	112.0
	S I-7	200	13.9	139.5	0.0	3.66	218.7
	S I-8	200	20.0	195.5	13.0	3.50	—
S X II	S II-1	200	14.6	29.0	-3.0	3.70	79.3
	S II-2	200	14.6	80.0	-5.0	3.73	140.4
	S II-3	200	10.0	148.0	-11.0	3.82	171.5
	S II-4	200	5.0	154.0	-20.0	3.95	91.8
	S II-5	200	19.0	伝播→破断	(0.0)	—	—
	S II-6	200	19.0	197.0	10.0	3.53	—
	S II-7	200	14.6	55.0	-9.0	3.79	111.9
A X I	A I-1	200	17.5	111.0	-43.5	4.36	215.4
	A I-2	200	12.0	164.0	-50.0	4.48	251.2
	A I-3	200	7.0	117.0	-63.5	4.77	90.4
	A I-4	200	22.0	伝播→破断	(-30.0)	—	—
	A I-5	200	22.0	72.0	-30.0	4.12	197.8
	A I-6	200	17.5	伝播→破断	(-42.0)	—	—
	A I-7	200	3.0	69.0	-102.0	5.85	265
	A I-8	200	15.8	164.0	-40.0	4.29	314.0
A X II	A II-1	150	20.0	伝播→破断	(-50.0)	—	—
	A II-2	150	20.0	73.0	-44.0	4.37	191.4
	A II-3	150	14.0	149.0	-50.0	4.48	—
	A II-4	150	10.0	伝播→破断	(-70.0)	—	—
	A II-5	150	5.0	50.0	-78.0	5.13	37.1
	A II-6	150	10.0	82.0	-63.0	4.76	105.2
	A II-7	150	25.0	63.0	-35.5	4.21	215.2

第 1 図 二重引張試験片形状

の各種遷移温度を第 2 表に一覧する。

さらに、素材の脆性亀裂伝播特性を求めるために、第 1 図に示すような寸法の試験片を用いて、二重引張試験を実施した。試験装置としては、50 トン補助引張装置付 200 トン アムスラー型引張試験機を使用した。試験結果を第 3 表・第 2 図・第 3 図に示す。

第 2 図は試験結果をそのまま図示したものであり、第 3 表の K_{IC} 値および第 3 図の K_{IC} 値と $1/T$ (T =亀裂伝播停止限界温度)との間の関係は、金沢・越賀^{5),6)}等によつて提案された表示法によつたものである。この場合 K_{IC} 値は次式により求めたものである。

$$K_{IC} = \sigma \sqrt{c} \sqrt{\frac{2B}{\pi c} \tan \frac{\pi c}{2B}} \quad (1)$$

第2図 二重引張試験結果 (素材)

第3図 二重引張試験結果 (素材)

ただし σ = 伝播部平均引張応力 (kg/mm²)

c = 亀裂伝播部入口から脆性亀裂先端までの距離 (mm) (第4図参照)

B = 亀裂伝播部の幅 (mm) (第4図参照)

なお、第2図・第3図の実験曲線は、SK 鋼・AK 鋼ともチャージ I・II を共に含めた平均値として示したもので、第3図中に記した実験式は、各々の試験結果を最小2乗法によつて整理して求めたものである。

3.2 低サイクル疲労試験ならびにその結果

3.2.1 試験方法

試験装置——電磁石を用いた簡単な装置を装備することにより、一定周期の荷重変動繰返しが自動的に得られるようにした、200 トン アムスラー型引張試験機を使用した。

試験片——第5図に示すような寸法の試験片 (応力集中率 = 約 1.2) を供試した。ただし、試験機の能力が 200 トンなので、試験片の一部 (SK 鋼 1 枚・AK 鋼 2 枚) を最小断面幅 250 mm とし、高応力の試験に用いた。

試験温度——SK 鋼は一般船体用軟鋼のため室温で、AK 鋼は冷凍型 LPG タンク用鋼材としての用途を考慮して -50°C で実施した。同一条件で実施した切欠き付き試験片での低温試験実施状況を第6図に示す。

荷重条件——引張り片振れとし、降伏点以上の高応力を荷重一定条件で負荷した。

繰返し速度 (周期)——原則として 1 サイクル 30 秒とした。ただし第 1 サイクル目は試験片の降伏が著しいので、目標の荷重 (繰返し荷重) に到達するまで徐々に負荷を増大し、荷重が目標値に到達した瞬間に除荷した。

3.2.2 試験結果 S-N 線図を第7図に示す。第7図の繰返し応力 (σ_a) とは、試験前の試験片原断面に対する応力である。また破断繰返し数 (N) は、静的引張り破壊の場合を 0.5 サイクルとし、10 サイクル以上の場合には 0.5 サイクル繰り上げて数えた。さらに、第7図中、SK II 鋼・AKI 鋼 S-N 曲線の点線は、この試験結果を基準に引いたものであるが、実線は、後述の低サイクル疲労蓄積による靱性変化調査試験の際の結果を考慮して求めたものである。すなわち、低サイクル疲労蓄積による靱性変化調査試験用試験片に低サイクル疲労を蓄積する過程において、ひずみ量から推定した破断繰返し数 (寿命) を考慮したものである。

S-N 線図より、S-N 曲線は、静的破断応力からのほぼ平坦な部分と、それから先の傾斜した部分の 2 本の直線に近似されることが明らかであり、これら S-N 曲線の実験式を求めると下記のごとくなる。

素 材 1 サイクル蓄積後 500 サイクル蓄積後
第8図 電子顕微鏡による組織写真 (試験片符号
SII-k, 5000 倍 $\times 1/2$)

素 材 525 サイクル蓄積後
第9図 電子顕微鏡による組織写真 (試験片符号 AI-f,
5000 倍 $\times 1/2$)

第4表 二重引張試験結果 (SK 鋼. 疲労蓄積材)

供試材 符 号	試験片 符 号	疲労蓄積条件		電磁依 掃部巾 B (mm)	電磁依 掃部平均 力 $\bar{\sigma}$ (kg/mm ²)	電磁長さ O (mm)	停止温度 (最高温度) T (°C)	$\frac{10^5}{T}$ (°K ⁻¹)	K ₀ (kg/mm ²)
		繰返し応力 (kg/mm ²)	繰返し回数 (cycle)						
SK I	SI-a	410	1	180	13.9	153.5	22.0	3.39	—
	SI-b	410	1	180	10.0	143.5	18.0	3.44	—
	SI-c	410	200	180	13.9	57.0	18.5	3.45	109.6
	SI-d	410	280	180	13.9	129.5	28.0	3.32	214.7
	SI-e	410	508	180	13.9	138.0	31.5	3.28	240.2
	SI-f	410	508	180	10.0	124.0	24.0	3.34	150.0
	SI-g	410	2157	170	14.5	48.5	20.0	3.41	108.9
	SI-h	410	2157	180	13.9	82.0	24.5	3.36	156.7
	SI-i	410	2157	180	13.9	38.5	17.5	3.44	87.9
	SI-j	400	6800	180	13.9	51.0	21.0	3.40	102.8
	SI-k	380	2157	180	13.9	78.5	25.0	3.36	128.6
	SI-l	380	2157	180	13.9	59.0	21.0	3.40	111.9
	SI-m	380	2157	180	10.0	93.5	17.5	3.44	110.4
	SI-n	350	1	180	13.9	62.0	7.0	3.57	113.3
	SI-o	350	1	180	10.0	破断→破断	(0.0)	—	—
SK II	SI-p	350	2157	180	13.9	89.5	20.5	3.41	148.1
	SI-q	350	2157	180	10.0	104.0	14.0	3.48	121.1
	SI-a	451	1	180	14.6	発生のみ伝達	(20.0)	—	—
	SI-b	451	1	180	14.6	伝達→破断	(12.5)	—	—
	SI-c	451	52	180	14.6	伝達→破断	(25.5)	—	—
	SI-d	451	52	150	14.6	47.0	30.0	3.30	104.3
	SI-e	451	182	150	14.6	58.0	32.0	3.28	112.3
	SI-f	451	182	150	10.0	61.0	24.0	3.34	84.2
	SI-g	451	182	180	6.0	発生のみ伝達	(21.0)	—	—
	SI-h	428	1	150	14.6	73.0	28.0	3.32	139.7
	SI-i	428	1	150	10.0	94.0	18.0	3.44	119.9
	SI-j	428	500	150	14.6	54.0	28.5	3.32	116.7
	SI-k	428	500	150	10.0	91.0	21.5	3.40	115.9
	SI-l	428	1750	150	14.6	67.0	34.0	3.24	131.2
	SI-m	428	1750	150	10.0	34.0	14.5	3.48	61.3
	SI-n	428	1750	150	6.0	34.0	5.5	3.59	54.9

注：疲労蓄積温度条件：室温

験温度について述べれば、SK 鋼は室温で、AK 鋼は -50°C で疲労を蓄積した。また、本試験は、静的破断応力に近い高応力の繰返しを蓄積することによる靱性変化を調査することを目的としたので、蓄積繰返し荷重としては、試験前断面での応力が静的破断応力（低サイクル疲労試験片での静的破断応力）の 95%~77% になるような値をえらんだ。さらに、低サイクル疲労蓄積量は第7図に示した S-N 曲線を基準にし、1 サイクルならびに破断繰返し数の 75% 位までの各種条件をえらんだ。

第5表 二重引張試験結果 (AK 鋼・疲労蓄積材)

供試材 符 号	試験片 符 号	疲労蓄積条件		亀裂伝 播部巾 B (mm)	亀裂伝 播部平 均応力 σ (Kg/mm^2)	亀裂長さ C (mm)	停止温度 (最高温度) T ($^{\circ}\text{C}$)	$\frac{10^3}{T}$ ($^{\circ}\text{K}^{-1}$)	K_{IC} ($\text{Kg}/\text{mm}^{3/2}$)
		繰返し応力 (Kg/mm^2)	繰返し回数 (Cycle)						
AK-I	AI-a	54.1	1	150	17.5	伝播→破断	(-210)	—	—
	AI-b	54.1	1	150	17.5	93.0	-4.0	3.72	207.4
	AI-c	54.1	150	150	17.5	46.0	-11.0	3.82	123.6
	AI-d	54.1	150	150	10.0	56.0	-21.0	3.97	79.7
	AI-e	54.1	525	150	17.5	58.0	-6.0	3.75	142.6
	AI-f	54.1	525	150	10.0	51.0	-26.5	4.06	75.1
	AI-g	51.2	1	150	17.5	56.0	-11.5	3.82	139.4
	AI-h	51.2	700	150	17.5	53.0	-10.0	3.80	134.7
	AI-i	51.2	700	150	10.0	64.0	-22.0	3.98	87.0
	AI-j	51.2	2450	150	17.5	63.0	-7.5	3.77	150.6
	AI-k	51.2	2450	150	10.0	58.0	-39.5	4.28	63.4

注：疲労蓄積温度条件：-50 $^{\circ}\text{C}$ 第6表 K_{IC} 値ならびに蓄積歪量一覧

供試材 符 号	試験片 符 号	$\frac{10^3}{T}$ ($^{\circ}\text{K}^{-1}$)	K_{IC} ($\text{Kg}/\text{mm}^{3/2}$)	亀裂停止点の 蓄積歪量 ϵ (%)
SK-I	SI-o	3.43	109.6	10.5
	SI-d	3.32	216.7	10.5
	SI-e	3.28	240.2	15.3
	SI-f	3.34	150.0	15.3
	SI-g	3.41	100.9	46.5
	SI-h	3.36	138.7	27.5
	SI-i	3.44	87.9	32.0
	SI-j	3.40	102.8	27.3
	SI-k	3.36	128.6	10.5
	SI-l	3.40	111.9	12.3
	SI-m	3.44	110.4	10.5
	SI-n	3.57	115.3	3.0
	SI-p	3.61	148.1	5.8
	SI-q	3.48	121.1	5.5
SK-II	SII-d	3.30	104.5	15.0
	SII-e	3.28	112.3	22.0
	SII-f	3.34	84.2	41.0
	SII-h	3.32	139.7	7.0
	SII-i	3.44	119.9	7.5
	SII-j	3.32	113.7	15.5
	SII-k	3.40	115.9	16.5
	SII-l	3.24	131.2	29.0
	SII-m	3.48	61.5	31.0
	SII-n	3.59	36.9	22.5
AK-I	AI-b	3.72	207.4	10.0
	AI-c	3.82	123.6	11.0
	AI-d	3.97	79.7	9.0
	AI-e	3.75	142.6	22.0
	AI-f	4.06	75.1	20.0
	AI-g	3.82	139.4	7.0
	AI-h	3.80	134.7	15.5
	AI-i	3.98	87.0	16.0
	AI-j	3.77	150.6	25.0
	AI-k	4.28	63.4	22.5

第10図 二重引張試験結果 (SK 鋼・疲労蓄積材)

第11図 二重引張試験結果 (AK 鋼・疲労蓄積材)

疲労蓄積材の二重引張試験片は、低サイクル疲労による破断予想部（最小断面部）が、二重引張試験における脆性亀裂伝播部と一致するように採取した。また亀裂伝播部幅は、素材試験片に関しては第1図に示したごとく 200 mm としたが、この試験においては、低サイクル疲労蓄積による試験片幅の減少により 200 mm の試験片を採取できなかつたので、180~150 mm とした。さらに亀裂発生部のプレスノッチは、深さ 6 mm 入れた。

また、低サイクル疲労蓄積による供試材の組織変化を調査するために、疲労蓄積過程において試験片最小断面中央部表面組織のレプリカ法による電子顕微鏡写真を撮影した。組織測定表面は素材を研磨エッチし、以後はそのままの状態で表面組織のレプリカのみ作製していった。SK 鋼ならびに AK 鋼についての電子顕微鏡写真の代表例を、第8図および第9図に示す。

4.2 試験結果

低サイクル疲労蓄積材の試験片符号・疲労蓄積条件・二重引張試験結果等を、第4表および第5表に一覧する。表中の K_c 値は先に記した(1)式により求めたものである。さらに、各試験片の二重引張試験による脆性亀裂停止点での低サイクル疲労蓄積による伸び率（ひずみ量， $gauge\ length=40\ mm$ ）を第6表に一覧する。これら低サイクル疲労蓄積材の二重引張試験結果を、SK 鋼は第10図に、AK 鋼は第11図に図示する。図中に記した実験式は、各々全ての試験結果を最小2乗法によつて整理して求めたものである。

第12図 二重引張試験結果（素材，疲労蓄積材）

さきに示した SK 鋼ならびに AK 鋼の素材に関する二重引張試験結果（第3図）と、第10図および第11図に示した低サイクル疲労蓄積材の二重引張試験結果とを同一グラフに示すと第12図のごとくなる。

以上の試験結果から、低サイクル疲労蓄積により二重引張試験結果には相当悪影響をおよぼすことは明らかであるが、低サイクル疲労蓄積条件すなわち蓄積繰返し応力ならびに蓄積繰返し回数による明瞭な影響は認められない。

5 二重引張試験結果の検討

脆性亀裂伝播停止遷移条件におよぼす低サイクル疲労蓄積による影響を論ずるにあたり、さきに述べたごとく、蓄積繰返し応力ならびに蓄積繰返し回数による明瞭な影響が求められなかつた以上、材料に蓄積されたひずみ量で整理すれば満足すべき結論が得られるのではないかということは、容易に考えることであろう。著者等もこの考えに基づいて試験結果の検討を試みることにする。

第10図および第11図においては、蓄積ひずみ量すなわち二重引張試験による脆性亀裂停止点での低サイクル疲労蓄積による伸び率の影響は、非常に不明瞭である。そこで、著者等の考えた一試みは、各々の実験値全てを同一温度における K_c 値に換算し、その K_c 値と蓄積ひずみ量との関係を求めようとするものである。すなわち、おのおの実験値を最小2乗法によつて整理して求めた実験式（第10図・第11図中に記した実験式）に沿つて平行移動し、SK 鋼の場合は 0°C すなわち $10^3/T=3.66$ における K_c 値に、また AK 鋼の場合は -50°C すなわち $10^3/T=4.48$ における K_c 値にそれぞれ換算し、その結果を ${}_0K_c$ および $_{-50}K_c$ という記号で示し、この ${}_0K_c$ 値および $_{-50}K_c$ 値と脆性亀裂停止点での低サイクル疲労蓄積による伸び率との関係を求めたのである。第7表・第13図・第14図はこれらの結果を示したものである。

この場合、厳密に考えて、蓄積ひずみ量の違いによる材質変化を考慮するならば、全実験値に関し同一の実験式を基準に換算することは問題である。すなわち、蓄積ひずみ量の違いにより実験値を何段階かのグループに分け、各グループごとに実験式を求め、その実験式を基準に換算すべきである。しかるに、第10図・第11図において明らかなごとく、二重引張試験結果に対する蓄積ひずみ量の違いによる規則性のある変化は認めがたかつたの

第7表 ${}_0K_c$ 値、 $-50K_c$ 値ならびに蓄積歪量一覧

供試材 符 号	試験片 符 号	0℃にお ける ${}_0K_c$ 値 (kg/mm ²)	亀裂停止点の 蓄積歪量 ε (%)
SK. I	SI-c	4.11	10.5
	SI-d	9.19	10.5
	SI-e	9.25	15.5
	SI-f	6.75	15.5
	SI-g	5.57	44.8
	SI-h	4.50	22.5
	SI-i	5.04	52.0
	SI-j	5.52	27.5
	SI-k	5.94	18.5
	SI-l	5.80	12.5
	SI-m	6.35	10.5
	SI-n	9.15	5.0
	SI-o	7.79	5.8
	SI-p	7.22	5.5
	SI-q	7.22	5.5

供試材 符 号	試験片 符 号	0℃にお ける ${}_0K_c$ 値 (kg/mm ²)	亀裂停止点の 蓄積歪量 ε (%)
SK. II	SII-d	4.20	15.0
	SII-e	4.27	22.0
	SII-f	5.79	41.0
	SII-h	5.92	7.0
	SII-i	6.74	7.5
	SII-j	4.74	15.5
	SII-k	5.98	16.5
	SII-l	4.51	29.0
	SII-m	5.86	5.10
	SII-n	5.08	22.5

供試材 符 号	試験片 符 号	-50℃にお ける ${}_0K_c$ 値 (kg/mm ²)	亀裂停止点の 蓄積歪量 ε (%)
AK. I	AI-b	4.51	10.0
	AI-c	5.55	11.0
	AI-d	2.88	9.0
	AI-e	5.28	22.0
	AI-f	5.21	20.0
	AI-g	5.71	7.0
	AI-h	5.47	15.5
	AI-i	5.25	14.0
	AI-j	5.45	25.0
	AI-k	4.24	22.5

第13図 蓄積歪量と ${}_0K_c$ 値との関係(SK鋼) 第14図 蓄積歪量と $-50K_c$ 値との関係(AK鋼)

で、止むなく、SK鋼・AK鋼とも各々の全実験値をそれぞれ1グループとみなして、 ${}_0K_c$ 値および $-50K_c$ 値を求めたのである。

第13図より、SK鋼の場合、蓄積ひずみ量約25%以下では、蓄積ひずみ量と規則性のある関係を保ちながら K_c 値は変化する傾向、すなわち

$$\log {}_0K_c = -A\varepsilon + B \quad (5)$$

ただし、 A 、 B =定数

ε =蓄積ひずみ量(%)

なる関係が存在するようであるが、蓄積ひずみ量が約25%以上になると ${}_0K_c$ 値はほぼ一定になるようである。さらに、今回の試験結果での ${}_0K_c$ 値の最小値は、蓄積ひずみ量22.5%において示され、その値は素材の平均値の約1/5程度であつた。一方第14図より、AK鋼の場合、実験点が少ないので明確なことは言えないが、蓄積ひずみ量が7%~25%の範囲においては $-50K_c$ 値はほぼ一定の値を示すようであり、その平均値は素材の平均値の約1/4.5程度であつた。さらに、今回の試験結果での $-50K_c$ 値の最小値は、素材の平均値の約1/5.5程度であつた。

6 結 論

一般船体用軟鋼ならびにフェライト系強靱鋼について、降伏点以上の高応力範囲で低サイクル疲労を蓄積後二重引張試験を実施し、次のような結論を得た。

(1) 低サイクル疲労蓄積すなわち繰返し引張りによる予ひずみは、単純予ひずみ(1回の塑性加工)の場合

と同様、脆性亀裂伝播停止特性に相当悪影響を与えるが、蓄積繰返し応力の変化および蓄積繰返し回数の変化が、脆性亀裂伝播停止特性の劣化量におよぼす有意差は認められない。

(2) 一般船体用軟鋼(セミキルド鋼)の場合、脆性亀裂伝播停止遷移条件におよぼす低サイクル疲労蓄積による劣化量の度合は、蓄積ひずみ量が約 25% 以下なら蓄積ひずみ量の増加に伴い大きくなるが、蓄積ひずみ量が約 25% 以上になると一定になるようである。

(3) 実験によつて得られた脆性亀裂伝播停止遷移条件におよぼす低サイクル疲労蓄積による劣化量の最大の度合は、一般船体用軟鋼(セミキルド鋼)の場合 0°Cにおける K_{IC} 値で素材平均値の約 $1/5$ であり、フェライト系強靱鋼(強制冷却後焼もどしたアルミキルド鋼)の場合 -50°Cにおける K_{IC} 値で素材平均値の約 $1/5.5$ である。

終りに臨み、本報告を作成するに当つて有益なご助言・ご討論をいただいた造船協会電気溶接研究委員会第2・第6分科金沢武主査ほか委員各位に深甚なる謝意を表する次第である。また、絶大な忍耐力によつて長期間にわたる実験を遂行された三菱重工長崎研究所松本栄氏・川辺智信氏に厚く感謝の意を表する。

7 参 考 文 献

- 1) 三菱重工設計計算委員会 “MH 設計計算標準” 三菱重工技術研究会 (昭. 39) p.34~p. 40
- 2) B. F. Langer, “Design of Pressure Vessels for Low-Cycle Fatigue”, Trans. ASME, Series D. Vol. 84 (1962) p. 389
- 3) 山内英和, 山本成 “Ni-Cr-Mo 鋼の高温塑性疲労試験” 材料, 第 13 巻 第 126号 (昭.39) p. 152
- 4) 吉識雅夫, 金沢武, 町田進 “鋼材の脆性破壊伝播試験に関する一考察——とくに平坦型および勾配型二重引張試験について——” 造船協会論文集, 第 113 号 (昭.38) p. 125
- 5) 越賀房夫, 今沢理, 竹花莊治 “鋼板における脆性亀裂の停止遷移現象” 造船協会論文集, 第 114 号 (昭. 38) p. 200
- 6) M. Yoshiki, T. Kanazawa & F. Koshiga, “Recent Studies on Brittle Fracture Propagation-Arrest in Japan”, The Documents on the Japan American Scientific Seminar, Session 5-2, (1964. 6)
- 7) 阿部三郎 “常温予歪の鋼材の脆性亀裂発生伝播両特性に及ぼす影響” 造船協会論文集, 第 113 号 (昭. 38) p. 115
- 8) 寺沢一雄, 大谷碧, その他 “高温予歪が鋼の残留延性に及ぼす影響” 造船協会論文集, 第 108 号 (昭. 35) p. 419
- 9) G. P. Tilly, P. P. Benham, “Load Cycling in the Low Endurance Range in Relation to Brittle Fracture of Mild Steel”, Iron & Steel Inst., J. Vol. 200, Part 3, (1962) p. 216
- 10) 金沢武, 町田進, 多田洋 “低サイクル疲労が脆性破壊伝播停止特性におよぼす影響について” 造船協会電気溶接研究委員会第2分科資料, 2-41-8 (昭. 41)